

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

Hasil penelitian yang diperoleh dari variasi komposisi campuran *Crude Palm Oil* (CPO) dan minyak jelantah dengan perbedaan kecepatan pengadukan pada proses transesterifikasi biodiesel disajikan dalam bentuk data hasil pengamatan. Data tersebut kemudian dianalisis untuk mengetahui pengaruh masing-masing variabel terhadap yield biodiesel serta karakteristik produk yang dihasilkan.

Sebelum proses Transesterifikasi dilakukan, bahan baku yang di variasikan terlebih dahulu dianalisis kadar *Free Fatty Acid* (FFA) untuk memastikan kelayakan penggunaan katalis basa KOH. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh variasi bahan baku memiliki nilai FFA di bawah batas kritis 5%, sehingga dapat langsung diproses melalui reaksi transesterifikasi tanpa memerlukan tahap esterifikasi pendahuluan. Data hasil pengujian, data pengamatan, dan perhitungan FFA disajikan pada Lampiran A.

4.1.1 Data Pengamatan Biodiesel

Penelitian ini dilakukan untuk memproduksi biodiesel melalui reaksi transesterifikasi menggunakan campuran *Crude Palm Oil* (CPO) dan minyak jelantah sebagai bahan baku. Proses transesterifikasi dilakukan menggunakan katalis KOH 1% pada suhu 60°C selama 60 menit. Variabel penelitian yang digunakan meliputi variasi komposisi campuran CPO dan minyak jelantah serta kecepatan pengadukan.

Variasi komposisi bahan baku yang digunakan terdiri atas 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, dan 0:100, sedangkan kecepatan pengadukan yang diterapkan yaitu 400 rpm dan 600 rpm. Pengamatan dilakukan untuk mengetahui pengaruh kedua variabel tersebut terhadap *yield* biodiesel yang dihasilkan. Nilai *yield* digunakan sebagai indikator keberhasilan proses Transesterifikasi karena menunjukkan tingkat konversi bahan baku menjadi biodiesel.

Data hasil percobaan yang meliputi volume bahan baku, komposisi campuran CPO dan minyak jelantah, kecepatan pengadukan, serta *yield* biodiesel yang dihasilkan pada setiap perlakuan disajikan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Analisa Biodiesel Berdasarkan % *Yield* dengan Katalis KOH 1% dan suhu 60 °C.

No Sampel	Volume Bahan Baku (mL)	Komposisi CPO : MJ (%)	Kecepatan Pengadukan (rpm)	<i>Yield</i> (%) Dengan <i>Baffled</i>	<i>Yield</i> (%) Tanpa <i>Baffled</i>
1	1000	100 : 0	400	45	-
2			600	60	50
3		75 : 25	400	50	-
4			600	69	60
5		50 : 50	400	55	-
6			600	75	64
7		25 : 75	400	60	-
8			600	80	70
9		0 : 100	400	65	-
10			600	78	68

4.1.2 Data Hasil Pengujian Karakteristik Biodiesel

Setelah proses produksi biodiesel selesai dilakukan, tahap selanjutnya adalah pengujian karakteristik biodiesel untuk mengetahui kualitas produk yang dihasilkan. Pengujian dilakukan berdasarkan parameter densitas, viskositas, angka asam, nilai kalor, dan angka setana.

Karena jumlah sampel yang dihasilkan cukup banyak, pengujian karakteristik biodiesel dilakukan pada lima sampel dengan nilai yield tertinggi. Pemilihan sampel didasarkan pada nilai yield biodiesel yang diperoleh, karena yield merupakan indikator keberhasilan proses transesterifikasi yang menunjukkan tingkat konversi trigliserida menjadi metil ester (Knothe et al., 2010). Kelima sampel yang dipilih berasal dari variasi komposisi campuran CPO dan minyak jelantah pada kecepatan pengadukan 600 rpm yang menghasilkan yield biodiesel lebih tinggi dibandingkan kecepatan pengadukan 400 rpm.

Hasil pengujian karakteristik biodiesel selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi pengaruh komposisi bahan baku terhadap mutu biodiesel serta kesesuaiannya dengan persyaratan mutu biodiesel berdasarkan SNI 7182:2015. Data hasil pengujian karakteristik biodiesel disajikan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Data hasil analisa biodiesel berdasarkan karakteristik

Sampel (CPO:MJ) %	Densitas (kg/m ³)	Viskositas (cSt)	Angka Asam (mg KOH/g)	Nilai Kalor (MJ/kg)	Cetane number
S1 (100 : 0)	851,1	5,2	0,48	29,59	52.0
S2 (75 : 25)	874,7	5,0	0,43	31,54	54.7
S3 (50 : 50)	879,5	4,8	0,38	34,12	61.6
S4 (25: 75)	885,4	4,5	0,24	36,95	67.9
S5 (0 : 100)	888,2	4,2	0,28	37,94	72.4

4.1.3 Data Hasil Analisis *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS)

Analisis *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) dilakukan untuk mengidentifikasi komponen senyawa penyusun biodiesel hasil transesterifikasi. Pengujian dilakukan pada sampel biodiesel dengan komposisi 25% CPO : 75% minyak jelantah karena menghasilkan yield tertinggi, yaitu 80% pada kecepatan pengadukan 600 rpm. Hasil identifikasi senyawa utama biodiesel disajikan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Hasil Identifikasi Senyawa Biodiesel Berdasarkan Analisis Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)

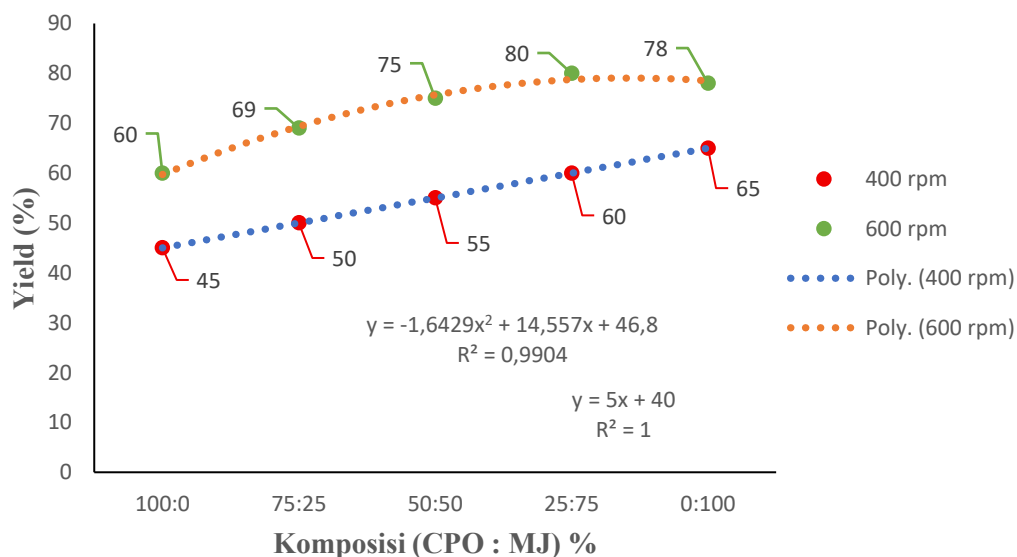
No	Waktu Retensi (RT) (menit)	Senyawa Utama	Rumus Molekul	Area (%)
1	14,43	<i>Dodecanoic acid, methyl ester (Methyl Laurate)</i>	C13H26O2	7,80
2	16,79	<i>Methyl tetradecanoate (Methyl Myristate)</i>	C15H30O2	8,90
3	18,88	<i>Hexadecanoic acid, methyl ester (Methyl Palmitate)</i>	C17H34O2	23,05
4	20,56	<i>Octadecenoic acid methyl ester</i>	C19H36O2	29,45
5	20,81	<i>9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester (Methyl Oleate)</i>	C19H36O2	4,69
6	20,89	<i>Octadecanoic acid, methyl ester (Methyl Stearate)</i>	C19H38O2	5,29
Total Luas Area Senyawa Utama				79,18

4.2 Pembahasan Hasil Penelitian

Pembahasan ini menguraikan pengaruh variasi komposisi *Crude Palm Oil* (CPO) dan minyak jelantah (MJ) serta kecepatan pengadukan terhadap yield dan karakteristik biodiesel. Karakteristik yang dianalisis meliputi densitas, viskositas, angka asam, nilai kalor, dan angka setana sesuai SNI 7182:2015. Selain itu, dilakukan analisis komposisi senyawa biodiesel menggunakan GC-MS untuk mengidentifikasi senyawa penyusun yang terbentuk selama proses transesterifikasi. Hasil penelitian diinterpretasikan berdasarkan teori dan dibandingkan dengan penelitian terdahulu untuk menjelaskan pengaruh variabel penelitian terhadap kualitas biodiesel.

4.2.1 Pengaruh Variasi Komposisi Dan Kecepatan Pengadukan Terhadap Yield Biodiesel

Yield biodiesel digunakan sebagai indikator untuk menentukan efektivitas proses produksi biodiesel. Semakin tinggi nilai *yield* yang dihasilkan, semakin besar jumlah biodiesel yang berhasil dikonversi dari bahan baku. Pada penelitian ini, *yield* biodiesel dianalisis pada berbagai komposisi campuran CPO dan minyak jelantah dengan variasi kecepatan pengadukan 400 rpm dan 600 rpm. Data hasil pengujian *yield* biodiesel ditunjukkan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11. Pengaruh Komposisi Campuran CPO dan Minyak Jelantah dengan Kecepatan Pengadukan 400 rpm dan 600 rpm terhadap *Yield* Biodiesel.

Berdasarkan Gambar 4.11, nilai yield biodiesel pada kecepatan pengadukan 400 rpm dengan penggunaan baffled masing-masing sebesar 45%, 50%, 55%, 60%, dan 65% untuk komposisi CPO:MJ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, dan 0:100. Pada kecepatan pengadukan 600 rpm dengan baffled, yield meningkat menjadi 60%, 69%, 75%, 80%, dan 78%. Sementara itu, pada kondisi tanpa baffled dengan kecepatan pengadukan 600 rpm diperoleh yield sebesar 50%, 60%, 64%, 70%, dan 68%.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan proporsi minyak jelantah hingga komposisi CPO:MJ 25:75 menyebabkan yield biodiesel meningkat. Yield tertinggi diperoleh pada komposisi 25:75 sebesar 80%, sedangkan yield terendah diperoleh pada komposisi 100:0 sebesar 45%. Kondisi ini menunjukkan bahwa pencampuran CPO dan minyak jelantah pada proporsi tertentu mampu menghasilkan kondisi reaksi yang lebih optimal dibandingkan penggunaan CPO murni. Perbedaan komposisi bahan baku dapat memengaruhi sifat fisik dan kimia minyak yang berpengaruh terhadap efektivitas reaksi transesterifikasi. Menurut Gui et al. (2008), karakteristik bahan baku merupakan faktor penting yang menentukan keberhasilan pembentukan biodiesel.

Peningkatan yield biodiesel hingga komposisi CPO:MJ 25:75 menunjukkan bahwa kondisi pencampuran antara minyak, metanol, dan katalis berlangsung lebih efektif sehingga hambatan perpindahan massa berkurang. Kondisi tersebut meningkatkan konversi trigliserida menjadi metil ester dan menghasilkan yield biodiesel yang lebih tinggi. Reaksi transesterifikasi merupakan reaksi reversibel sehingga keberhasilan proses sangat dipengaruhi oleh kemampuan sistem dalam menggeser kesetimbangan ke arah pembentukan produk. Menurut Knothe et al. (2010), kondisi pencampuran yang baik dan konversi reaksi yang tinggi akan mendorong kesetimbangan bergeser ke arah pembentukan biodiesel sehingga yield yang diperoleh semakin besar.

Pada komposisi 0:100, yield biodiesel mengalami sedikit penurunan dibandingkan komposisi 25:75. Yield yang diperoleh masing-masing sebesar 65% pada 400 rpm dengan baffled, 78% pada 600 rpm dengan baffled, dan 68% pada 600 rpm tanpa baffled. Penurunan tersebut diduga disebabkan oleh adanya produk oksidasi, polimerisasi, dan senyawa pengotor yang terbentuk selama penggunaan

minyak jelantah berulang kali. Senyawa-senyawa tersebut dapat menghambat proses transesterifikasi dan menurunkan efektivitas konversi trigliserida menjadi metil ester. Menurut Atadashi et al. (2012), keberadaan senyawa hasil degradasi pada minyak bekas dapat memengaruhi kualitas bahan baku dan menurunkan efisiensi pembentukan biodiesel.

Selain komposisi bahan baku, kecepatan pengadukan juga berpengaruh terhadap yield biodiesel. Peningkatan kecepatan pengadukan dari 400 rpm menjadi 600 rpm meningkatkan yield pada seluruh variasi komposisi. Pada komposisi 100:0, yield meningkat dari 45% menjadi 60%, sedangkan pada komposisi 25:75 meningkat dari 60% menjadi 80%. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan pengadukan mampu memperbaiki pencampuran antara minyak, metanol, dan katalis sehingga reaksi berlangsung lebih efektif. Kondisi tersebut juga membantu mempercepat tercapainya kesetimbangan reaksi ke arah pembentukan metil ester sehingga konversi biodiesel meningkat.

Secara teoritis, minyak dan metanol merupakan dua fase yang sulit bercampur sehingga diperlukan pengadukan yang memadai untuk meningkatkan kontak antar reaktan. Semakin tinggi intensitas pengadukan, semakin besar luas permukaan kontak antara minyak dan metanol sehingga perpindahan massa berlangsung lebih efektif dan konversi trigliserida menjadi metil ester meningkat. Leung et al. (2010) menyatakan bahwa kecepatan pengadukan merupakan faktor penting yang memengaruhi laju reaksi dan yield biodiesel yang dihasilkan.

Persamaan regresi pada Gambar 4.1 menunjukkan hubungan antara komposisi campuran CPO dan minyak jelantah dengan yield biodiesel pada masing-masing kecepatan pengadukan. Pada kecepatan pengadukan 400 rpm diperoleh persamaan regresi linier $y = 5x + 40$ dengan nilai $R^2 = 1$, yang menunjukkan bahwa model regresi linier mampu menggambarkan hubungan antara komposisi campuran bahan baku dan yield biodiesel dengan sangat baik. Nilai koefisien determinasi tersebut menunjukkan bahwa seluruh variasi data yield pada kondisi 400 rpm dapat dijelaskan oleh model regresi yang digunakan. Sementara itu, pada kecepatan pengadukan 600 rpm diperoleh persamaan regresi polinomial $y = -1,6429x^2 + 14,557x + 46,8$ dengan nilai $R^2 = 0,9904$. Nilai koefisien determinasi yang mendekati 1 menunjukkan bahwa model polinomial memiliki tingkat

kecocokan yang sangat baik dalam menggambarkan hubungan antara komposisi bahan baku dan yield biodiesel. Bentuk kurva polinomial memperlihatkan bahwa yield meningkat hingga komposisi CPO:MJ 25:75, kemudian sedikit menurun pada komposisi 0:100, sehingga model polinomial lebih representatif dalam menggambarkan kecenderungan perubahan data dibandingkan model linier pada kondisi tersebut.

Sebagai data pembanding terhadap reaktor hasil modifikasi, dilakukan pengamatan menggunakan reaktor tanpa baffled pada kondisi operasi yang sama. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa reaktor berbaffled menghasilkan yield biodiesel yang lebih tinggi dibandingkan reaktor tanpa baffled pada seluruh variasi komposisi. Pada kecepatan pengadukan 600 rpm, yield meningkat dari 50% menjadi 60% pada komposisi 100:0, dari 60% menjadi 69% pada komposisi 75:25, dari 64% menjadi 75% pada komposisi 50:50, dari 70% menjadi 80% pada komposisi 25:75, dan dari 68% menjadi 78% pada komposisi 0:100. Secara umum, reaktor berbaffled menghasilkan yield sekitar 9-11% lebih tinggi dibandingkan reaktor tanpa baffled.

Perbedaan hasil tersebut menunjukkan bahwa modifikasi reaktor melalui penambahan baffled menghasilkan proses pencampuran yang lebih efektif. Baffled berfungsi mengurangi pembentukan vortex dan meningkatkan turbulensi sehingga distribusi minyak, metanol, dan katalis menjadi lebih homogen. Kondisi tersebut meningkatkan perpindahan massa selama proses transesterifikasi sehingga konversi trigliserida menjadi metil ester berlangsung lebih optimal (Paul et al., 2004). Data pembanding ini digunakan untuk menunjukkan kinerja reaktor hasil modifikasi dan bukan merupakan variabel utama dalam penelitian.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Tunjungsari et al. (2020) yang melaporkan yield biodiesel sebesar 78,6% pada campuran minyak sawit dan minyak jelantah menggunakan katalis basa. Yield tertinggi pada penelitian ini sebesar 80%, sedikit lebih tinggi dibandingkan hasil penelitian tersebut. Perbedaan tersebut diduga dipengaruhi oleh variasi komposisi bahan baku, kondisi operasi, kecepatan pengadukan, serta penggunaan reaktor yang telah dimodifikasi dengan baffled sehingga proses pencampuran berlangsung lebih efektif. Temuan ini juga didukung oleh Atadashi et al. (2012) yang menyatakan bahwa pencampuran yang

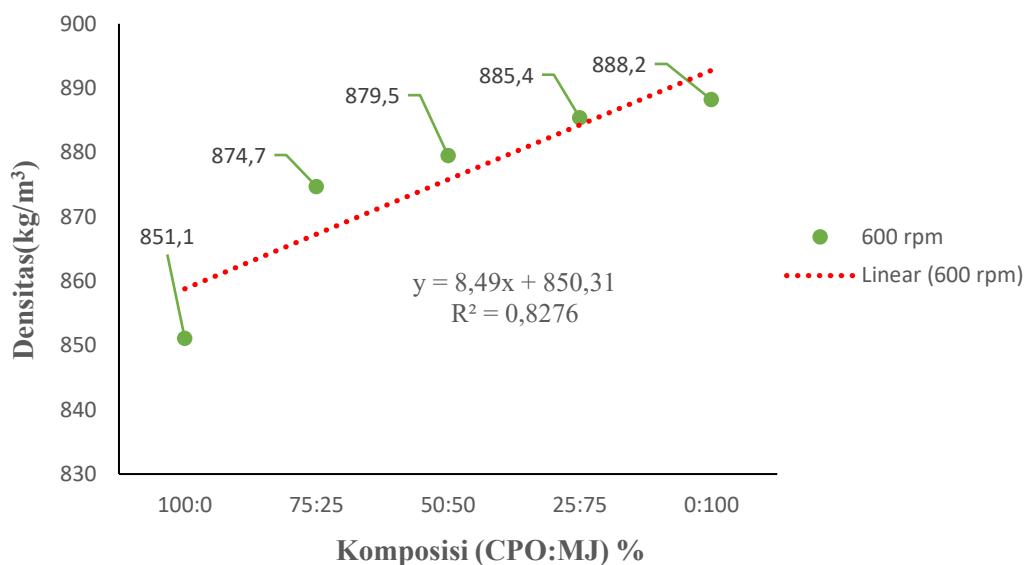
lebih efektif mampu meningkatkan konversi trigliserida menjadi metil ester sehingga yield biodiesel dapat mencapai lebih dari 75%.

Berdasarkan hasil penelitian, yield biodiesel tertinggi diperoleh pada komposisi CPO:MJ 25:75 dengan kecepatan pengadukan 600 rpm menggunakan reaktor berbaffled sebesar 80%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi komposisi bahan baku yang tepat dan kecepatan pengadukan yang lebih tinggi mampu menghasilkan yield biodiesel yang optimal. Selain itu, penggunaan reaktor yang telah dimodifikasi dengan baffled mendukung proses pencampuran yang lebih homogen selama transesterifikasi sehingga diperoleh produktivitas biodiesel yang lebih tinggi.

4.2.2 Analisa Karakteristik Biodiesel sesuai dengan SNI

A. Densitas

Densitas merupakan parameter fisik penting untuk menilai kualitas biodiesel. Pengujian dilakukan guna mengetahui pengaruh variasi komposisi campuran CPO dan minyak jelantah (MJ) terhadap densitas biodiesel pada kecepatan pengadukan 600 rpm. Hasil pengujian densitas disajikan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Pengaruh Komposisi CPO dan Minyak Jelantah terhadap Densitas Biodiesel pada Kecepatan Pengadukan 600 rpm.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi komposisi *Crude Palm Oil* (CPO) dan minyak jelantah (MJ) memberikan pengaruh terhadap nilai densitas biodiesel pada kecepatan pengadukan 600 rpm. Secara umum, densitas biodiesel meningkat seiring bertambahnya proporsi minyak jelantah dalam campuran. Pada komposisi 100:0 diperoleh densitas sebesar 851,1 kg/m³, kemudian meningkat menjadi 874,7 kg/m³ pada komposisi 75:25, 879,5 kg/m³ pada komposisi 50:50, 885,4 kg/m³ pada komposisi 25:75, dan mencapai nilai tertinggi sebesar 888,2 kg/m³ pada komposisi 0:100.

Peningkatan densitas tersebut menunjukkan bahwa semakin besar proporsi minyak jelantah yang digunakan, semakin tinggi kerapatan massa biodiesel yang dihasilkan. Nilai densitas tertinggi pada komposisi 0:100 mengindikasikan bahwa biodiesel dari minyak jelantah memiliki struktur molekul yang lebih rapat dibandingkan biodiesel dari CPO murni. Kondisi ini diduga disebabkan oleh proses

pemanasan berulang yang memicu oksidasi, polimerisasi, dan degradasi termal sehingga terbentuk senyawa dengan massa molekul dan kepolaran yang lebih tinggi. Keberadaan senyawa hasil degradasi tersebut meningkatkan kerapatan molekul biodiesel sehingga nilai densitas semakin besar.

Rentang densitas biodiesel yang diperoleh sebesar 851,1-888,2 kg/m³ menunjukkan bahwa variasi komposisi campuran CPO dan minyak jelantah memberikan pengaruh yang nyata terhadap karakteristik fisik biodiesel yang dihasilkan.

Secara teoritis, densitas biodiesel dipengaruhi oleh komposisi asam lemak, panjang rantai karbon, derajat ketidakjenuhan, dan massa molekul senyawa penyusunnya. Biodiesel yang mengandung senyawa dengan massa molekul lebih besar dan struktur molekul yang lebih rapat cenderung memiliki densitas yang lebih tinggi (Knothe, 2005). Menurut Knothe et al. (2010), minyak yang telah mengalami oksidasi akan menghasilkan senyawa polar dan produk degradasi yang dapat meningkatkan densitas biodiesel. Ma dan Hanna (1999) juga menyatakan bahwa keberadaan produk oksidasi pada bahan baku dapat memengaruhi sifat fisik biodiesel, termasuk densitas. Sementara itu, Demirbas (2009) menjelaskan bahwa perubahan struktur kimia akibat degradasi termal minyak akan meningkatkan kerapatan molekul sehingga densitas biodiesel cenderung meningkat.

Persamaan regresi linier pada Gambar 4.2 diperoleh sebesar $y = 8,49x + 850,31$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,8276. Nilai koefisien determinasi tersebut menunjukkan bahwa model regresi linier mampu menjelaskan hubungan antara variasi komposisi campuran CPO dan minyak jelantah terhadap densitas biodiesel dengan cukup baik, di mana 82,76% variasi densitas biodiesel dapat dijelaskan oleh model, sedangkan 17,24% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model, seperti karakteristik bahan baku, kandungan senyawa hasil degradasi, serta kondisi proses transesterifikasi. Kemiringan garis regresi yang bernilai positif menunjukkan bahwa peningkatan proporsi minyak jelantah cenderung meningkatkan densitas biodiesel. Hal ini sejalan dengan hasil pengujian yang menunjukkan peningkatan densitas dari 851,1 kg/m³ pada komposisi CPO:MJ 100:0 menjadi 888,2 kg/m³ pada komposisi 0:100.

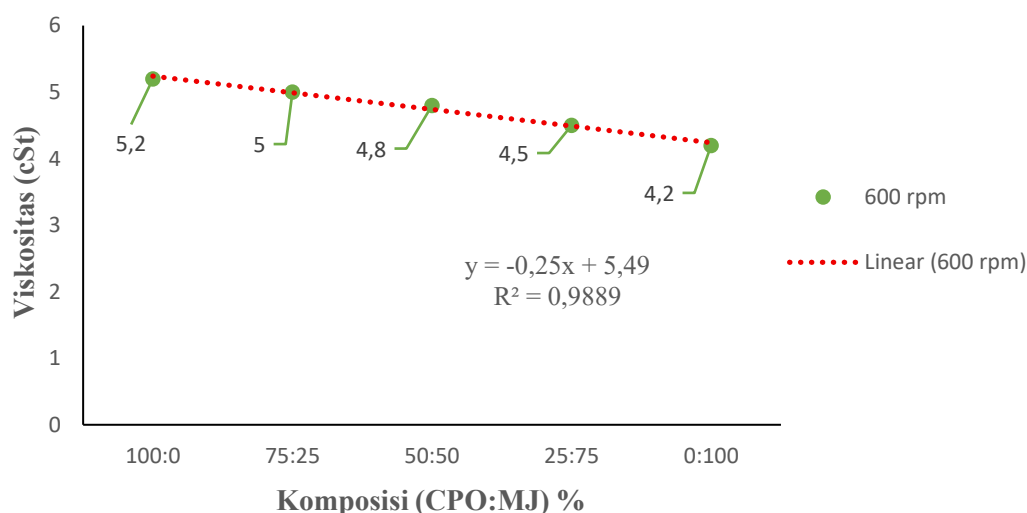
Hasil tersebut juga didukung oleh komposisi senyawa penyusun biodiesel berdasarkan analisis GC-MS. Analisis GC-MS menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan didominasi oleh senyawa metil ester rantai panjang C16-C18, terutama octadecenoic acid methyl ester sebesar 29,45%, methyl palmitate sebesar 23,05%, dan methyl stearate sebesar 5,29%. Dominasi senyawa dengan rantai karbon yang lebih panjang dan massa molekul yang relatif besar tersebut turut berkontribusi terhadap peningkatan densitas biodiesel. Menurut Knothe et al. (2010), biodiesel yang tersusun oleh metil ester rantai panjang cenderung memiliki kerapatan yang lebih tinggi dibandingkan senyawa dengan rantai karbon yang lebih pendek.

Jika ditinjau berdasarkan SNI 7182:2015, seluruh nilai densitas biodiesel yang diperoleh masih berada dalam rentang yang dipersyaratkan, yaitu 850-890 kg/m³. Hasil ini menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan pada seluruh variasi komposisi telah memenuhi standar mutu biodiesel nasional. Meskipun terjadi peningkatan densitas seiring bertambahnya proporsi minyak jelantah, nilai yang diperoleh masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk aplikasi sebagai bahan bakar.

Nilai densitas biodiesel pada penelitian ini berkisar antara 851,1-888,2 kg/m³. Hasil tersebut sejalan dengan rentang densitas biodiesel berbasis minyak nabati yang dilaporkan oleh Knothe et al. (2010), yaitu 860-900 kg/m³. Penelitian Sembiring et al. (2024) juga melaporkan densitas biodiesel dari minyak jelantah berada pada kisaran 875-889 kg/m³. Kesamaan rentang nilai tersebut menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan memiliki karakteristik fisik yang sebanding dengan hasil penelitian sebelumnya serta memenuhi karakteristik biodiesel komersial, sehingga minyak jelantah berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku alternatif dalam produksi biodiesel.

B. Viskositas

Gambar berikut memperlihatkan hasil pengamatan hubungan antara komposisi campuran *Crude Palm Oil* (CPO) dan minyak jelantah (MJ) terhadap nilai viskositas biodiesel pada kondisi kecepatan pengadukan 600 rpm. Data tersebut ditampilkan dalam bentuk grafik sebagaimana disajikan pada Gambar 4.13 untuk mempermudah dalam melihat perubahan nilai viskositas pada setiap variasi komposisi bahan baku yang digunakan.



Gambar 4.13 Pengaruh Komposisi CPO dan Minyak Jelantah terhadap Viskositas Biodiesel pada Kecepatan Pengadukan 600 rpm.

Berdasarkan Gambar 4.3, nilai viskositas biodiesel mengalami penurunan seiring meningkatnya proporsi minyak jelantah dalam campuran. Pada komposisi CPO 100:0 diperoleh viskositas sebesar 5,2 cSt, kemudian menurun menjadi 5,0 cSt pada komposisi 75:25, 4,8 cSt pada komposisi 50:50, 4,5 cSt pada komposisi 25:75, dan mencapai nilai terendah sebesar 4,2 cSt pada komposisi 0:100.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi proporsi minyak jelantah yang digunakan, semakin rendah viskositas biodiesel yang dihasilkan. Penurunan viskositas ini mengindikasikan bahwa biodiesel yang terbentuk memiliki kemampuan mengalir yang lebih baik. Nilai viskositas terendah pada komposisi 0:100 menunjukkan bahwa penggunaan minyak jelantah sebagai bahan baku menghasilkan biodiesel dengan hambatan aliran yang lebih kecil dibandingkan penggunaan CPO murni. Kondisi ini diduga berkaitan dengan perubahan

karakteristik minyak jelantah akibat proses pemanasan berulang selama penggunaan.

Biodiesel dengan viskositas tertinggi diperoleh pada komposisi 100:0 sebesar 5,2 cSt, sedangkan viskositas terendah diperoleh pada komposisi 0:100 sebesar 4,2 cSt. Penurunan sebesar 1,0 cSt menunjukkan bahwa variasi komposisi bahan baku memberikan pengaruh yang cukup nyata terhadap karakteristik aliran biodiesel yang dihasilkan.

Selama proses penggunaan dan pemanasan berulang, minyak jelantah mengalami berbagai perubahan kimia seperti oksidasi, hidrolisis, dan degradasi termal yang mengubah komposisi senyawa penyusunnya. Setelah proses transesterifikasi berlangsung, trigliserida dan senyawa antara yang masih terdapat dalam bahan baku dikonversi menjadi metil ester. Metil ester memiliki struktur molekul yang lebih sederhana dibandingkan trigliserida sehingga menghasilkan biodiesel dengan viskositas yang lebih rendah dan kemampuan alir yang lebih baik.

Selain itu, penurunan viskositas juga menunjukkan bahwa proses transesterifikasi berlangsung dengan baik. Semakin tinggi konversi trigliserida menjadi metil ester, semakin rendah viskositas biodiesel yang dihasilkan karena metil ester memiliki struktur molekul yang lebih sederhana dibandingkan trigliserida. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan proporsi minyak jelantah hingga komposisi 0:100 masih mampu menghasilkan biodiesel dengan karakteristik aliran yang baik.

Secara teoritis, viskositas dipengaruhi oleh massa molekul, panjang rantai karbon, serta gaya tarik antarmolekul pada senyawa penyusunnya. Biodiesel yang tersusun oleh metil ester memiliki viskositas lebih rendah dibandingkan minyak nabati karena struktur molekulnya lebih sederhana dan memiliki hambatan aliran yang lebih kecil (Demirbas, 2009). Menurut Knothe et al. (2010), viskositas merupakan salah satu parameter penting dalam kualitas biodiesel karena berpengaruh terhadap proses atomisasi bahan bakar pada sistem injeksi mesin diesel. Biodiesel dengan viskositas yang lebih rendah umumnya menghasilkan penyemprotan bahan bakar yang lebih baik sehingga pembakaran berlangsung lebih sempurna. Ma dan Hanna (1999) juga menjelaskan bahwa keberhasilan konversi

trigliserida menjadi metil ester akan menurunkan viskositas biodiesel secara signifikan dibandingkan minyak asalnya.

Persamaan regresi linier pada Gambar 4.3 diperoleh sebesar $y = -0,25x + 5,4$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9804. Nilai koefisien determinasi tersebut menunjukkan bahwa model regresi linier memiliki tingkat kecocokan yang sangat baik dalam menggambarkan hubungan antara komposisi campuran CPO dan minyak jelantah terhadap viskositas biodiesel. Sebesar 98,04% variasi nilai viskositas dapat dijelaskan oleh perubahan komposisi bahan baku, sedangkan 1,96% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model, seperti karakteristik bahan baku, kandungan senyawa hasil degradasi, maupun kondisi proses transesterifikasi. Nilai kemiringan (slope) yang negatif menunjukkan bahwa peningkatan proporsi minyak jelantah menyebabkan penurunan viskositas biodiesel. Hasil tersebut sesuai dengan data pengujian yang menunjukkan penurunan viskositas dari 5,2 cSt pada komposisi CPO:MJ 100:0 menjadi 4,2 cSt pada komposisi 0:100.

Hasil analisis GC-MS menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan didominasi oleh senyawa metil ester, terutama *octadecenoic acid methyl ester*, *methyl palmitate*, dan *methyl stearate*. Dominasi senyawa metil ester tersebut menunjukkan bahwa proses konversi trigliserida menjadi biodiesel berlangsung dengan baik. Menurut Knothe et al. (2010), pembentukan metil ester merupakan faktor utama yang menyebabkan penurunan viskositas minyak menjadi biodiesel karena metil ester memiliki hambatan aliran yang lebih rendah dibandingkan trigliserida.

Jika dibandingkan dengan standar SNI 7182:2015, seluruh sampel biodiesel yang dihasilkan telah memenuhi persyaratan viskositas kinematik biodiesel, yaitu berada pada rentang 2,3-6,0 cSt. Nilai viskositas biodiesel yang diperoleh berkisar antara 4,2 hingga 5,2 cSt sehingga masih berada dalam batas yang diperbolehkan untuk digunakan sebagai bahan bakar diesel.

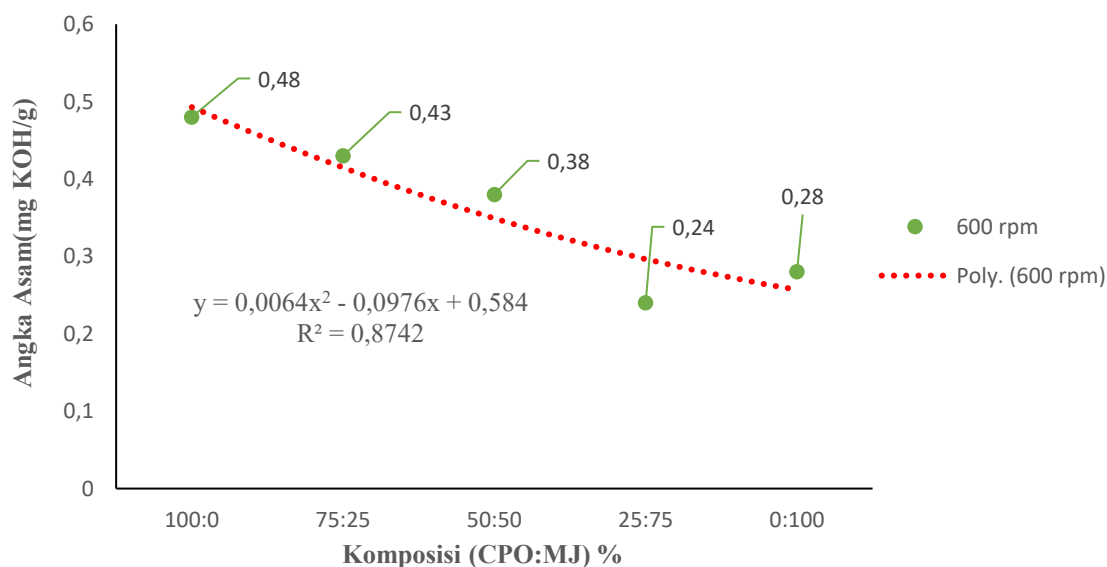
Nilai viskositas biodiesel pada penelitian ini juga sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya. Demirbas (2009) melaporkan bahwa viskositas biodiesel berbasis minyak nabati umumnya berada pada rentang 4,0-5,5 cSt. Penelitian Monde et al. (2021) juga menunjukkan bahwa biodiesel dari minyak jelantah

memiliki viskositas sekitar 4,3-4,9 cSt. Kesamaan rentang nilai tersebut menunjukkan bahwa proses transesterifikasi yang dilakukan mampu menghasilkan biodiesel dengan karakteristik aliran yang baik dan sesuai dengan karakteristik biodiesel komersial.

Secara keseluruhan, peningkatan proporsi minyak jelantah dalam campuran CPO dan MJ menyebabkan penurunan viskositas biodiesel. Penurunan tersebut berkaitan dengan perubahan karakteristik bahan baku serta terbentuknya metil ester hasil transesterifikasi yang memiliki struktur molekul lebih sederhana dibandingkan trigliserida. Kondisi tersebut menghasilkan biodiesel dengan sifat alir yang lebih baik dan tetap memenuhi standar mutu SNI 7182:2015.

C. Angka Asam

Gambar berikut memperlihatkan hasil pengamatan hubungan antara komposisi campuran *Crude Palm Oil* (CPO) dan minyak jelantah (MJ) terhadap nilai Angka asam biodiesel pada kondisi kecepatan pengadukan 600 rpm. Data tersebut ditampilkan dalam bentuk grafik sebagaimana disajikan pada Gambar 4.14 untuk mempermudah dalam melihat perubahan nilai angka asam pada setiap variasi komposisi bahan baku yang digunakan.



Gambar 4.14 Pengaruh Komposisi CPO dan Minyak Jelantah terhadap Angka Asam Biodiesel pada Kecepatan Pengadukan 600 rpm.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi komposisi *Crude Palm Oil* (CPO) dan minyak jelantah (MJ) memberikan pengaruh terhadap nilai angka asam biodiesel pada kecepatan pengadukan 600 rpm. Secara umum, angka asam

biodiesel mengalami penurunan seiring bertambahnya proporsi minyak jelantah hingga komposisi tertentu, kemudian meningkat kembali pada penggunaan minyak jelantah murni. Pada komposisi 100:0 diperoleh angka asam sebesar 0,48 mg KOH/g, kemudian menurun menjadi 0,43 mg KOH/g pada komposisi 75:25, 0,38 mg KOH/g pada komposisi 50:50, dan mencapai nilai terendah sebesar 0,24 mg KOH/g pada komposisi 25:75. Namun, pada komposisi 0:100 angka asam meningkat kembali menjadi 0,28 mg KOH/g.

Penurunan angka asam hingga komposisi 25:75 menunjukkan bahwa semakin sedikit asam lemak bebas yang tersisa dalam biodiesel yang dihasilkan. Nilai angka asam terendah pada komposisi 25:75 mengindikasikan bahwa proses konversi trigliserida menjadi metil ester berlangsung lebih efektif dibandingkan komposisi lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa pencampuran CPO dan minyak jelantah pada proporsi tertentu mampu menghasilkan kondisi reaksi yang lebih baik sehingga jumlah asam lemak bebas yang tertinggal dalam biodiesel menjadi lebih rendah.

Biodiesel dengan angka asam tertinggi diperoleh pada komposisi 100:0 sebesar 0,48 mg KOH/g, sedangkan nilai terendah diperoleh pada komposisi 25:75 sebesar 0,24 mg KOH/g. Perbedaan sebesar 0,24 mg KOH/g menunjukkan bahwa variasi komposisi bahan baku memberikan pengaruh yang cukup nyata terhadap kandungan asam lemak bebas yang tersisa dalam biodiesel.

Namun demikian, pada komposisi 0:100 angka asam biodiesel mengalami peningkatan menjadi 0,28 mg KOH/g. Meskipun masih memenuhi standar mutu biodiesel, peningkatan ini menunjukkan bahwa penggunaan minyak jelantah secara penuh masih menghasilkan biodiesel dengan kandungan asam lemak bebas yang sedikit lebih tinggi dibandingkan komposisi 25:75. Kondisi tersebut diduga berkaitan dengan keberadaan senyawa hasil oksidasi dan degradasi termal yang terbentuk selama penggunaan minyak jelantah berulang kali. Senyawa-senyawa tersebut dapat memengaruhi efektivitas proses transesterifikasi sehingga sebagian kecil asam lemak bebas masih tersisa dalam produk biodiesel.

Secara teoritis, angka asam merupakan parameter yang menunjukkan jumlah asam lemak bebas yang terkandung dalam biodiesel. Semakin rendah angka asam, semakin baik kualitas biodiesel yang dihasilkan karena menunjukkan bahwa

kandungan asam lemak bebas dalam produk semakin sedikit (Ma & Hanna, 1999). Menurut Abdullah et al. (2021), efektivitas proses transesterifikasi berpengaruh langsung terhadap penurunan angka asam karena reaksi yang berlangsung secara optimal mampu mengonversi trigliserida menjadi metil ester dan mengurangi kandungan asam lemak bebas dalam biodiesel.

Persamaan regresi polinomial pada Gambar 4.4 diperoleh sebesar $y = 0,0064x^2 - 0,0976x + 0,584$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,8742. Nilai koefisien determinasi tersebut menunjukkan bahwa model polinomial memiliki tingkat kesesuaian yang baik dalam menggambarkan hubungan antara variasi komposisi campuran CPO dan minyak jelantah terhadap angka asam biodiesel. Sebesar 87,42% variasi angka asam biodiesel dapat dijelaskan oleh perubahan komposisi campuran bahan baku, sedangkan 12,58% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model, seperti kandungan asam lemak bebas awal, produk oksidasi pada minyak jelantah, serta kondisi proses transesterifikasi. Bentuk kurva polinomial menunjukkan bahwa angka asam menurun seiring peningkatan proporsi minyak jelantah hingga mencapai nilai minimum pada komposisi CPO:MJ 25:75, kemudian mengalami sedikit peningkatan pada komposisi 0:100. Pola tersebut sesuai dengan hasil pengujian yang menunjukkan bahwa komposisi 25:75 menghasilkan angka asam terendah sebesar 0,24 mg KOH/g, sedangkan penggunaan minyak jelantah murni menghasilkan angka asam sedikit lebih tinggi, yaitu 0,28 mg KOH/g, yang diduga dipengaruhi oleh senyawa hasil oksidasi dan degradasi selama penggunaan minyak jelantah.

Hasil analisis GC-MS menunjukkan bahwa biodiesel didominasi oleh senyawa metil ester, terutama *octadecenoic acid methyl ester*, *methyl palmitate*, dan *methyl stearate*. Dominasi senyawa metil ester tersebut menunjukkan bahwa proses konversi trigliserida menjadi biodiesel berlangsung dengan baik. Menurut Knothe et al. (2010), pembentukan metil ester yang tinggi umumnya berkaitan dengan rendahnya kandungan asam lemak bebas yang tersisa dalam biodiesel sehingga angka asam yang diperoleh menjadi lebih rendah.

Jika ditinjau berdasarkan SNI 7182:2015, seluruh biodiesel yang dihasilkan telah memenuhi persyaratan mutu karena memiliki angka asam di bawah batas maksimum sebesar 0,5 mg KOH/g. Nilai angka asam biodiesel yang diperoleh

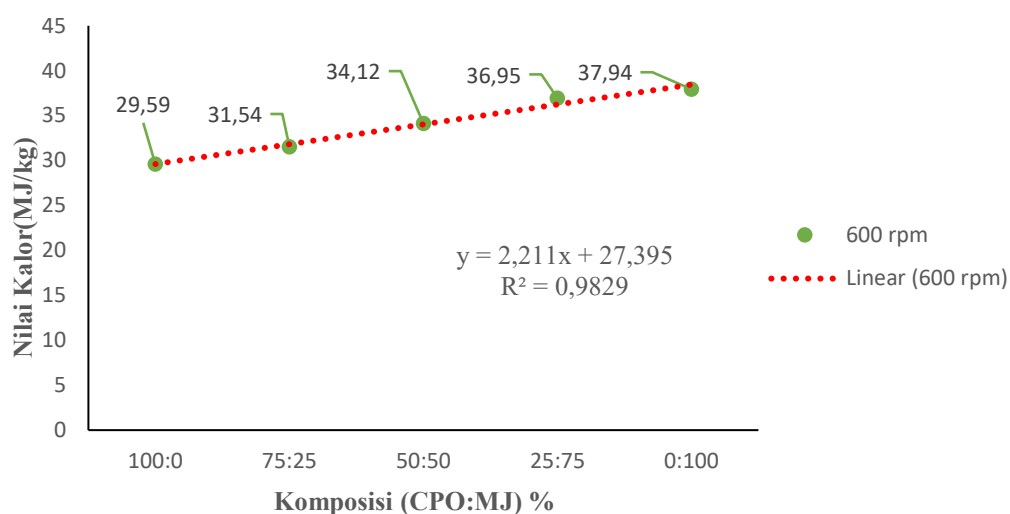
berkisar antara 0,24 hingga 0,48 mg KOH/g sehingga masih berada dalam rentang yang dipersyaratkan untuk biodiesel.

Nilai angka asam biodiesel pada penelitian ini juga sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya. Abdullah et al. (2021) melaporkan angka asam biodiesel berbahan baku minyak jelantah berada pada kisaran 0,27-0,45 mg KOH/g. Penelitian Monde et al. (2021) juga menunjukkan bahwa biodiesel dari minyak jelantah yang mengalami proses transesterifikasi secara optimal dapat menghasilkan angka asam mendekati 0,28 mg KOH/g. Kesamaan rentang nilai tersebut menunjukkan bahwa proses transesterifikasi yang dilakukan mampu menurunkan kandungan asam lemak bebas secara efektif dan menghasilkan biodiesel dengan kualitas yang sesuai standar.

Secara keseluruhan, variasi komposisi CPO dan minyak jelantah berpengaruh terhadap nilai angka asam biodiesel. Nilai angka asam terendah diperoleh pada komposisi CPO:MJ 25:75 sebesar 0,24 mg KOH/g, sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada komposisi 100:0 sebesar 0,48 mg KOH/g. Seluruh biodiesel yang dihasilkan memenuhi standar SNI 7182:2015 sehingga layak digunakan sebagai bahan bakar alternatif.

D. Nilai Kalor

Nilai kalor merupakan parameter penting dalam menilai mutu biodiesel karena menunjukkan jumlah energi panas yang dihasilkan dari pembakaran sempurna bahan bakar. Semakin tinggi nilai kalor, semakin besar energi yang dihasilkan sehingga performa biodiesel menjadi lebih baik. Pada penelitian ini, pengujian nilai kalor dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi komposisi campuran *Crude Palm Oil* (CPO) dan minyak jelantah (MJ) terhadap karakteristik energi biodiesel pada kecepatan pengadukan 600 rpm. Hasil pengujian disajikan pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Pengaruh Komposisi Campuran CPO dan Minyak Jelantah terhadap Nilai Kalor Biodiesel pada Kecepatan Pengadukan 600 rpm.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi komposisi *Crude Palm Oil* (CPO) dan minyak jelantah (MJ) memberikan pengaruh terhadap nilai kalor biodiesel pada kecepatan pengadukan 600 rpm. Secara umum, nilai kalor biodiesel meningkat seiring bertambahnya proporsi minyak jelantah dalam campuran. Pada komposisi 100:0 diperoleh nilai kalor sebesar 29,59 MJ/kg, kemudian meningkat menjadi 31,54 MJ/kg pada komposisi 75:25, 34,12 MJ/kg pada komposisi 50:50, 36,95 MJ/kg pada komposisi 25:75, dan mencapai nilai tertinggi sebesar 37,94 MJ/kg pada komposisi 0:100.

Peningkatan nilai kalor tersebut menunjukkan bahwa semakin besar proporsi minyak jelantah yang digunakan, semakin besar energi pembakaran yang dapat dihasilkan oleh biodiesel. Biodiesel dengan nilai kalor tertinggi diperoleh pada komposisi 0:100 sebesar 37,94 MJ/kg, sedangkan nilai kalor terendah diperoleh

pada komposisi 100:0 sebesar 29,59 MJ/kg. Selisih sebesar 8,35 MJ/kg menunjukkan bahwa variasi komposisi bahan baku memberikan pengaruh yang cukup nyata terhadap kandungan energi biodiesel yang dihasilkan.

Hasil analisis GC-MS menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan didominasi oleh senyawa metil ester rantai panjang C16-C18, terutama *octadecenoic acid methyl ester* sebesar 29,45%, *methyl palmitate* sebesar 23,05%, dan *methyl stearate* sebesar 5,29%. Senyawa-senyawa tersebut memiliki jumlah atom karbon yang relatif tinggi sehingga mampu menghasilkan energi pembakaran yang lebih besar. Menurut Knothe et al. (2010), semakin panjang rantai karbon metil ester, semakin tinggi kandungan energi yang tersimpan dalam biodiesel sehingga nilai kalor cenderung meningkat.

Peningkatan nilai kalor juga menunjukkan bahwa proses transesterifikasi berlangsung dengan baik dan mampu menghasilkan biodiesel yang didominasi oleh senyawa metil ester. Metil ester merupakan komponen utama biodiesel yang berperan dalam menghasilkan energi selama proses pembakaran. Semakin tinggi kandungan metil ester yang terbentuk, semakin baik karakteristik pembakaran biodiesel sehingga energi yang dihasilkan juga meningkat.

Secara teoritis, nilai kalor biodiesel dipengaruhi oleh komposisi asam lemak, panjang rantai karbon, derajat kejenuhan, dan kandungan oksigen dalam bahan bakar. Semakin tinggi kandungan karbon yang dapat terbakar, semakin besar energi yang dilepaskan selama proses pembakaran (Mehta & Anand, 2009). Biodiesel yang memiliki karakteristik asam lemak yang sesuai umumnya menghasilkan nilai kalor lebih tinggi karena mampu melepaskan energi panas yang lebih besar selama proses oksidasi. Menurut Knothe et al. (2010), biodiesel yang tersusun oleh metil ester rantai panjang umumnya memiliki nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan biodiesel yang didominasi oleh senyawa rantai karbon yang lebih pendek.

Persamaan regresi linier pada Gambar 4.5 diperoleh sebesar $y = 2,211x + 27,395$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9829. Nilai koefisien determinasi tersebut menunjukkan bahwa model regresi linier memiliki tingkat kesesuaian yang sangat baik dalam menggambarkan hubungan antara variasi komposisi campuran CPO dan minyak jelantah terhadap nilai kalor biodiesel. Sebesar 98,29% variasi nilai kalor biodiesel dapat dijelaskan oleh perubahan

komposisi campuran CPO dan minyak jelantah, sedangkan 1,71% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model, seperti komposisi asam lemak penyusun biodiesel, kandungan metil ester, serta kondisi proses transesterifikasi. Kemiringan garis regresi yang bernilai positif menunjukkan bahwa peningkatan proporsi minyak jelantah cenderung meningkatkan nilai kalor biodiesel. Hasil tersebut sejalan dengan data pengujian yang menunjukkan peningkatan nilai kalor dari 29,59 MJ/kg pada komposisi CPO:MJ 100:0 menjadi 37,94 MJ/kg pada komposisi 0:100, sehingga menunjukkan adanya hubungan linier yang sangat kuat antara variasi komposisi bahan baku dan energi pembakaran biodiesel yang dihasilkan.

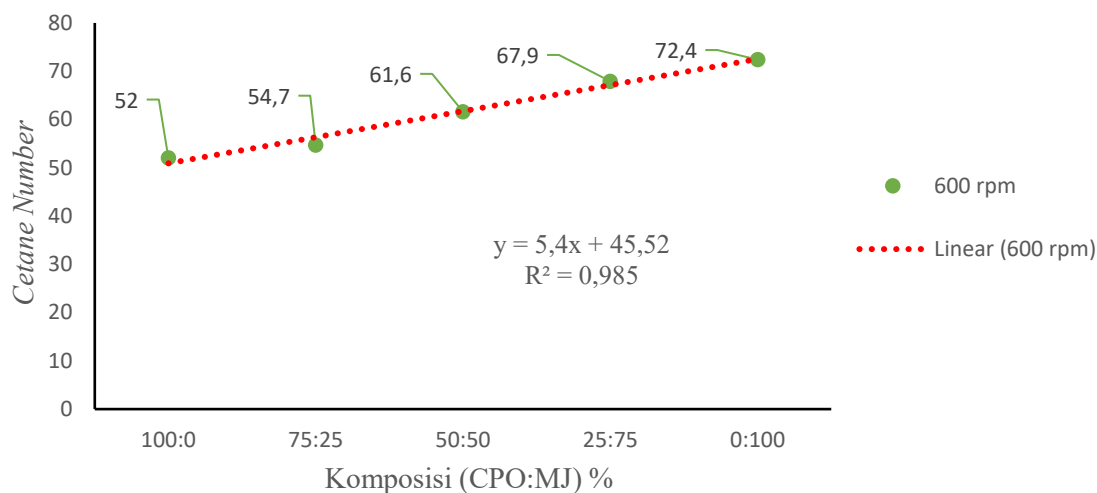
Nilai kalor biodiesel yang diperoleh pada penelitian ini berada pada rentang 29,59-37,94 MJ/kg. Nilai tertinggi diperoleh pada komposisi 0:100 sebesar 37,94 MJ/kg yang mendekati rentang nilai kalor biodiesel komersial, yaitu sekitar 37-40 MJ/kg. Hal ini menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan telah memiliki kandungan energi yang cukup baik dan berpotensi digunakan sebagai bahan bakar alternatif pengganti solar.

Hasil penelitian ini juga sejalan dengan penelitian Mehta dan Anand (2009) yang melaporkan bahwa nilai kalor biodiesel umumnya berada pada rentang 37-40 MJ/kg. Penelitian Ajis et al. (2025) juga menunjukkan bahwa biodiesel berbahan baku minyak nabati memiliki nilai kalor berkisar antara 30-39 MJ/kg. Kesamaan rentang nilai tersebut menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan memiliki karakteristik energi yang sesuai dengan biodiesel pada umumnya dan mampu menghasilkan energi pembakaran yang kompetitif.

Secara keseluruhan, peningkatan proporsi minyak jelantah dalam campuran CPO dan MJ menyebabkan peningkatan nilai kalor biodiesel. Nilai kalor tertinggi diperoleh pada komposisi CPO:MJ 0:100 sebesar 37,94 MJ/kg, sedangkan nilai terendah diperoleh pada komposisi 100:0 sebesar 29,59 MJ/kg. Hasil tersebut menunjukkan bahwa komposisi bahan baku berpengaruh terhadap karakteristik energi biodiesel yang dihasilkan dan bahwa penggunaan minyak jelantah mampu meningkatkan potensi energi pembakaran biodiesel.

E. Angka Setana (*Cetane Number*)

Angka setana (*cetane number*) merupakan parameter penting yang menunjukkan kualitas penyalaan biodiesel pada mesin diesel. Pengujian dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi komposisi campuran CPO dan minyak jelantah (MJ) terhadap nilai angka setana biodiesel pada kecepatan pengadukan 600 rpm. Hasil pengujian disajikan pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Pengaruh Komposisi Campuran CPO dan Minyak Jelantah terhadap Angka Setana (*Cetane Number*) Biodiesel pada Kecepatan Pengadukan 600 rpm.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi komposisi *Crude Palm Oil* (CPO) dan minyak jelantah (MJ) memberikan pengaruh terhadap nilai angka setana biodiesel pada kecepatan pengadukan 600 rpm. Secara umum, angka setana biodiesel meningkat seiring bertambahnya proporsi minyak jelantah dalam campuran. Pada komposisi 100:0 diperoleh angka setana sebesar 52, kemudian meningkat menjadi 54,7 pada komposisi 75:25, 61,6 pada komposisi 50:50, 67,9 pada komposisi 25:75, dan mencapai nilai tertinggi sebesar 72,4 pada komposisi 0:100.

Peningkatan angka setana tersebut menunjukkan bahwa semakin besar proporsi minyak jelantah yang digunakan, semakin baik karakteristik penyalaan biodiesel yang dihasilkan. Biodiesel dengan angka setana tertinggi diperoleh pada komposisi 0:100 sebesar 72,4, sedangkan nilai terendah diperoleh pada komposisi 100:0 sebesar 52. Selisih sebesar 20,4 menunjukkan bahwa variasi komposisi bahan

baku memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap kualitas penyalaan biodiesel.

Nilai angka setana yang semakin tinggi menunjukkan bahwa biodiesel memiliki waktu tunda penyalaan (*ignition delay*) yang semakin pendek. Kondisi tersebut menyebabkan proses pembakaran berlangsung lebih cepat dan lebih sempurna sehingga mampu meningkatkan efisiensi pembakaran pada mesin diesel. Dengan demikian, peningkatan proporsi minyak jelantah dalam campuran berkontribusi terhadap peningkatan kualitas pembakaran biodiesel yang dihasilkan. Hasil analisis GC-MS menunjukkan bahwa biodiesel didominasi oleh senyawa metil ester rantai panjang C16-C18, terutama *octadecenoic acid methyl ester* sebesar 29,45%, *methyl palmitate* sebesar 23,05%, dan *methyl stearate* sebesar 5,29%. Dominasi senyawa metil ester tersebut berkontribusi terhadap peningkatan angka setana biodiesel karena senyawa metil ester rantai panjang umumnya memiliki karakteristik penyalaan yang lebih baik. Menurut Knothe (2005), metil ester dengan rantai karbon yang lebih panjang cenderung memiliki nilai cetane number yang lebih tinggi karena lebih mudah mengalami penyalaan spontan selama proses pembakaran.

Peningkatan angka setana juga menunjukkan bahwa proses transesterifikasi berlangsung dengan baik dan menghasilkan biodiesel yang kaya akan metil ester. Semakin tinggi konversi trigliserida menjadi metil ester, semakin baik karakteristik pembakaran biodiesel yang dihasilkan. Biodiesel yang mengandung metil ester dalam jumlah tinggi umumnya memiliki kualitas penyalaan yang lebih baik dibandingkan minyak asalnya karena mampu mempercepat proses pembakaran di dalam ruang bakar mesin diesel.

Secara teoritis, angka setana merupakan ukuran kemampuan bahan bakar diesel untuk menyala secara spontan setelah proses injeksi ke dalam ruang bakar. Semakin tinggi angka setana, semakin cepat bahan bakar terbakar dan semakin pendek waktu tunda penyalaannya (Knothe, 2005). Nilai angka setana dipengaruhi oleh komposisi asam lemak, panjang rantai karbon, dan tingkat kejenuhan senyawa penyusun biodiesel. Biodiesel yang mengandung metil ester dengan rantai karbon lebih panjang dan tingkat kejenuhan yang lebih tinggi umumnya memiliki angka

setana yang lebih besar dibandingkan biodiesel yang didominasi oleh senyawa tidak jenuh (Moser, 2009).

Persamaan regresi linier pada Gambar 4.6 diperoleh sebesar $y = 5,4x + 45,52$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,985. Nilai koefisien determinasi tersebut menunjukkan bahwa model regresi linier memiliki tingkat kecocokan yang sangat baik dalam menggambarkan hubungan antara variasi komposisi campuran CPO dan minyak jelantah terhadap angka setana biodiesel. Sebesar 98,5% variasi angka setana biodiesel dapat dijelaskan oleh perubahan komposisi campuran CPO dan minyak jelantah, sedangkan 1,5% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model, seperti komposisi asam lemak, kandungan metil ester, dan kondisi proses transesterifikasi. Kemiringan garis regresi yang bernilai positif menunjukkan bahwa peningkatan proporsi minyak jelantah cenderung meningkatkan angka setana biodiesel. Hasil tersebut sesuai dengan data pengujian yang menunjukkan peningkatan angka setana dari 52 pada komposisi CPO:MJ 100:0 menjadi 72,4 pada komposisi 0:100, sehingga menunjukkan adanya hubungan linier yang sangat kuat antara variasi komposisi bahan baku dan karakteristik penyalan biodiesel.

Menurut Atadashi et al. (2012), kualitas biodiesel sangat dipengaruhi oleh jenis bahan baku dan keberhasilan proses transesterifikasi. Konversi trigliserida yang lebih tinggi akan menghasilkan biodiesel dengan karakteristik pembakaran yang lebih baik, termasuk peningkatan angka setana. Biodiesel dengan angka setana yang tinggi memiliki beberapa keunggulan, antara lain waktu tunda penyalan yang lebih singkat, pembakaran yang lebih sempurna, efisiensi pembakaran yang lebih baik, serta emisi hidrokarbon yang lebih rendah (Moser, 2009).

Jika ditinjau berdasarkan SNI 7182:2015, seluruh biodiesel yang dihasilkan telah memenuhi persyaratan mutu karena memiliki angka setana di atas batas minimum sebesar 51. Nilai angka setana yang diperoleh berkisar antara 52 hingga 72,4 sehingga seluruh sampel memenuhi standar biodiesel nasional dan layak digunakan sebagai bahan bakar alternatif.

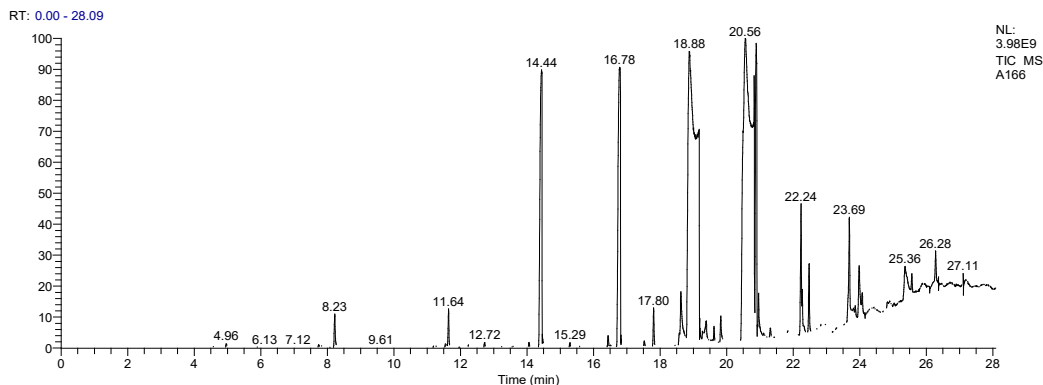
Hasil penelitian ini juga sejalan dengan penelitian Moser (2009) yang melaporkan angka setana biodiesel berbasis minyak nabati berada pada rentang 50-70. Selain itu, Knothe (2005) menyatakan bahwa biodiesel dengan kandungan metil

ester yang tinggi cenderung memiliki angka setana yang lebih besar dan menghasilkan karakteristik pembakaran yang lebih baik. Kesamaan hasil tersebut menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan memiliki kualitas penyalan yang baik dan sesuai dengan karakteristik biodiesel pada umumnya.

Secara keseluruhan, peningkatan proporsi minyak jelantah dalam campuran bahan baku meningkatkan nilai angka setana biodiesel. Nilai angka setana meningkat dari 52 pada komposisi 100% CPO : 0% MJ menjadi 72,4 pada komposisi 0% CPO : 100% MJ, yang menunjukkan bahwa penggunaan minyak jelantah dapat memperbaiki karakteristik penyalan dan kualitas pembakaran biodiesel.

4.2.5 Analisis Komposisi Senyawa Biodiesel Berdasarkan Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)

Kromatogram Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) digunakan untuk menunjukkan distribusi senyawa yang terdapat dalam biodiesel berdasarkan waktu retensi dan intensitas sinyal yang terdeteksi. Kromatogram hasil pengujian biodiesel ditunjukkan pada **Gambar 4.17**.



Gambar 4.17 Kromatogram Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)
Biodiesel

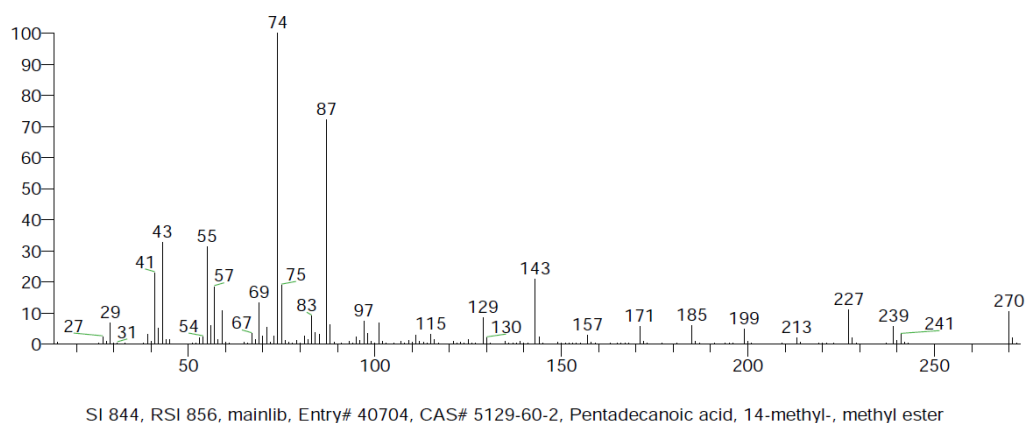
Berdasarkan kromatogram GC-MS pada Gambar 4.7, teridentifikasi beberapa puncak utama pada waktu retensi 14,43; 16,79; 18,88; 20,56; 20,81; dan 20,89 menit. Puncak dominan muncul pada waktu retensi 20,56 menit dengan persentase area sebesar 29,45% dan waktu retensi 18,88 menit dengan persentase area sebesar 23,05%. Puncak-puncak tersebut menunjukkan keberadaan senyawa golongan Fatty Acid Methyl Ester (FAME) yang merupakan komponen utama biodiesel. Biodiesel pada dasarnya tersusun atas mono-alkil ester asam lemak yang

dihasilkan melalui reaksi transesterifikasi minyak nabati atau lemak dengan alkohol rantai pendek, sehingga keberadaan FAME menjadi indikator keberhasilan pembentukan biodiesel (Knothe, 2005).

Hasil identifikasi senyawa pada Tabel 4.3 menunjukkan bahwa biodiesel didominasi oleh methyl laurate, methyl myristate, methyl palmitate, octadecenoic acid methyl ester, methyl oleate, dan methyl stearate. Senyawa-senyawa tersebut merupakan produk utama reaksi transesterifikasi antara trigliserida yang terdapat dalam CPO dan minyak jelantah dengan metanol. Menurut Gopinath et al. (2015), biodiesel umumnya tersusun atas metil ester asam lemak rantai panjang C16-C18 yang berasal dari asam palmitat, asam oleat, dan asam stearat.

Senyawa dengan persentase area terbesar adalah octadecenoic acid methyl ester sebesar 29,45%, diikuti oleh hexadecanoic acid methyl ester (methyl palmitate) sebesar 23,05%. Selain itu, teridentifikasi pula methyl myristate sebesar 8,90%, methyl laurate sebesar 7,80%, methyl stearate sebesar 5,29%, dan methyl oleate sebesar 4,69%. Dominasi metil ester rantai panjang C16-C18 menunjukkan karakteristik khas biodiesel berbahan baku minyak sawit dan minyak jelantah. Hasil ini sejalan dengan penelitian Gopinath et al. (2015) yang melaporkan bahwa biodiesel berbasis minyak nabati didominasi oleh methyl palmitate, methyl oleate, dan methyl stearate sebagai komponen utama penyusunnya.

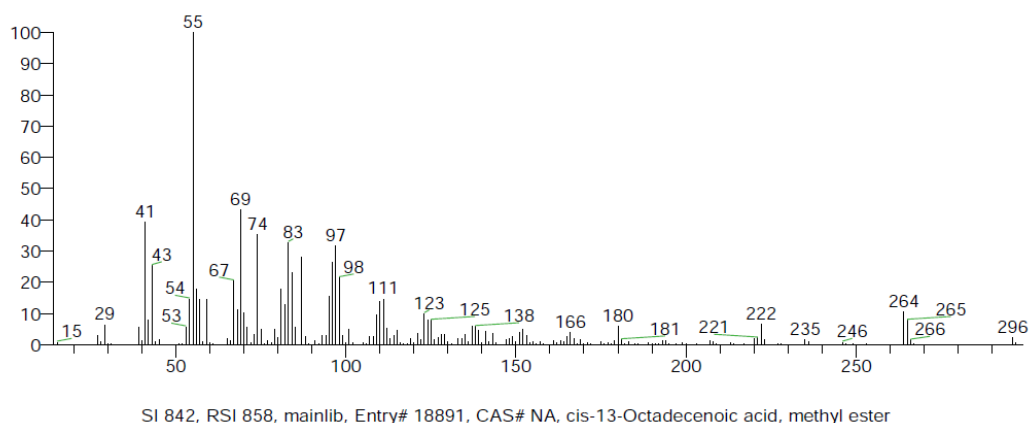
Untuk memastikan identitas senyawa yang terdeteksi pada kromatogram, dilakukan pencocokan spektrum massa terhadap pustaka (library) GC-MS. Spektrum massa senyawa dengan luas area terbesar dan terbesar kedua ditunjukkan



pada Gambar 4.18 dan Gambar 4.19.

Gambar 4.18 Spektrum Massa *Hexadecanoic Acid Methyl Ester (Methyl Palmitate)* pada Waktu Retensi 18,88 Menit

Spektrum massa pada waktu retensi 18,88 menit menunjukkan bahwa senyawa yang teridentifikasi adalah hexadecanoic acid methyl ester (methyl palmitate) dengan persentase area sebesar 23,05%. Senyawa ini merupakan metil ester yang berasal dari asam palmitat dan menjadi salah satu komponen utama biodiesel berbahan baku minyak sawit. Menurut Gopinath et al. (2015), methyl palmitate merupakan salah satu senyawa FAME dominan yang umum ditemukan pada biodiesel berbasis minyak sawit karena tingginya kandungan asam palmitat pada bahan baku tersebut. Keberadaan methyl palmitate menunjukkan bahwa trigliserida dalam campuran CPO dan minyak jelantah telah berhasil dikonversi menjadi metil ester melalui reaksi transesterifikasi..



Gambar 4.19 Spektrum Massa *Octadecenoic Acid Methyl Ester* pada Waktu Retensi 20,56 Menit

Spektrum massa pada waktu retensi 20,56 menit menunjukkan keberadaan octadecenoic acid methyl ester dengan persentase area terbesar yaitu 29,45%. Senyawa ini merupakan komponen dominan biodiesel yang dihasilkan dan termasuk golongan FAME rantai panjang C18. Menurut Knothe et al. (2010), metil ester rantai panjang C16-C18 memiliki kontribusi penting terhadap karakteristik biodiesel, terutama densitas, viskositas, nilai kalor, dan angka setana. Dominasi octadecenoic acid methyl ester pada biodiesel yang dihasilkan menunjukkan bahwa proses transesterifikasi berlangsung secara efektif sehingga menghasilkan senyawa metil ester sebagai produk utama reaksi.

Hasil identifikasi senyawa pada Tabel 4.3 menunjukkan bahwa biodiesel

tersusun atas methyl laurate sebesar 7,80%, methyl myristate sebesar 8,90%, methyl palmitate sebesar 23,05%, octadecenoic acid methyl ester sebesar 29,45%, methyl oleate sebesar 4,69%, dan methyl stearate sebesar 5,29%. Senyawa-senyawa tersebut merupakan komponen utama biodiesel yang termasuk dalam golongan Fatty Acid Methyl Ester (FAME). Menurut Knothe (2005), biodiesel yang berkualitas umumnya didominasi oleh senyawa FAME karena senyawa tersebut merupakan produk utama hasil reaksi transesterifikasi yang berfungsi sebagai komponen bahan bakar.

Dominasi octadecenoic acid methyl ester dan methyl palmitate menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan memiliki karakteristik khas biodiesel berbahan baku minyak sawit dan minyak jelantah. Keberadaan metil ester rantai panjang C16-C18 tidak hanya menunjukkan keberhasilan konversi trigliserida menjadi biodiesel, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan kualitas bahan bakar. Menurut Knothe et al. (2010), biodiesel yang mengandung metil ester rantai panjang cenderung memiliki kualitas pembakaran yang lebih baik, energi pembakaran yang lebih tinggi, serta kemampuan penyalaan yang lebih cepat dibandingkan biodiesel yang didominasi oleh senyawa rantai karbon pendek. Hal ini sejalan dengan hasil pengujian karakteristik biodiesel pada penelitian ini yang menunjukkan peningkatan nilai kalor dan angka setana seiring meningkatnya proporsi minyak jelantah dalam campuran bahan baku.

Total luas area senyawa utama Fatty Acid Methyl Ester (FAME) yang teridentifikasi mencapai 79,18%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar trigliserida dalam bahan baku telah berhasil dikonversi menjadi metil ester asam lemak. Menurut Atadashi et al. (2012), tingginya kandungan FAME merupakan indikator keberhasilan proses transesterifikasi karena menunjukkan bahwa konversi trigliserida menjadi biodiesel berlangsung secara efektif. Nilai FAME yang tinggi juga mengindikasikan bahwa reaksi berlangsung dengan baik sehingga pembentukan produk samping dan trigliserida yang tidak bereaksi dapat diminimalkan. Hasil ini sejalan dengan nilai yield biodiesel tertinggi yang diperoleh pada penelitian ini, yaitu sebesar 80% pada komposisi 25% CPO : 75% minyak jelantah dengan kecepatan pengadukan 600 rpm menggunakan baffled.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Gopinath et al. (2015) yang

melaporkan bahwa biodiesel berbasis minyak nabati umumnya didominasi oleh methyl palmitate, methyl oleate, dan methyl stearate sebagai komponen utama penyusun biodiesel. Kesamaan komposisi senyawa tersebut menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan memiliki karakteristik yang sesuai dengan biodiesel pada umumnya dan telah berhasil memenuhi karakteristik utama produk hasil transesterifikasi.

Secara keseluruhan, hasil analisis GC-MS menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan didominasi oleh senyawa Fatty Acid Methyl Ester (FAME), terutama octadecenoic acid methyl ester sebesar 29,45% dan methyl palmitate sebesar 23,05%. Total luas area FAME sebesar 79,18% mengindikasikan bahwa proses transesterifikasi berlangsung dengan baik dan berhasil mengonversi sebagian besar trigliserida menjadi metil ester. Dominasi senyawa FAME rantai panjang C16-C18 tersebut juga mendukung hasil pengujian densitas, viskositas, nilai kalor, dan angka setana yang menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan memiliki kualitas yang baik serta memenuhi karakteristik utama bahan bakar biodiesel.